

Министерство образования и науки РФ

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

УДК

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке
_____ Кружаев В.В.
«__» _____ 2013

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках выполнения п.1.2.2.3 Плана реализации мероприятий Программы развития
УрФУ на 2013 год

ПО ТЕМЕ:
«Установка измерения уровня остаточных напряжений в трубах»

—

(Заключительный)

Зав.кафедрой

(подпись, дата)

___А.А. Богатов_

Научный руководитель

(подпись, дата)

___А.А. Богатов_

Исполнитель

(подпись, дата)

___Г.В. Шимов_

Екатеринбург 2013

Реферат

1. ФИО автора (ов): Шимов Георгий Викторович, G. V. Shimov
2. Аннотация: *Основной причиной появления и развития коррозионных повреждений теплообменных труб парогенератора АЭС, определяющих срок его эксплуатации, является процесс коррозионного растрескивания металла под действием рабочих и остаточных растягивающих напряжений. Поэтому измерение уровня остаточных растягивающих напряжений в трубах является актуальной задачей. Описана конструкция и принцип работы опытной установки. Проведена апробация способа в лабораторных условиях*

The main reason for appearance and development of corrosion damage of the NPP steam generator heat exchanger pipes determining period of its operation, is the process of stress corrosion cracking of metal under the influence of the workers and the residual tensile stresses. Therefore, the level measuring of residual tensile stresses in pipes is an important task. It is described the construction and operation of the experimental installation. The approbation of the process in a laboratory production environment is carried out

3. Ключевые слова: теплообменные трубы, коррозионное растрескивание под напряжением, остаточные напряжения, измерение остаточных напряжений
Keywords: *heat exchange pipes, corrosion cracking, residual stresses, measurement of the residual stresses*
4. Тема отчета: Установка измерения уровня остаточных напряжений в трубах,
Installation for level measuring residual stress in the tubes

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. Рациональная методика анализа уровня и распределения остаточных напряжений в стенке трубы.....	13
2. Установка для определения уровня остаточных напряжений в трубах.....	25
ВЫВОДЫ.....	31
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим элементом АЭС являются парогенераторы - установки для выработки пара, подаваемого на турбину для выработки электроэнергии за счет тепла, получаемого от первого (реакторного) контура. Конструктивно парогенераторы представляют корпусные сосуды с несколькими тысячами труб. Общий вид парогенератора ПГВ-1500 представлен на рисунке 1.

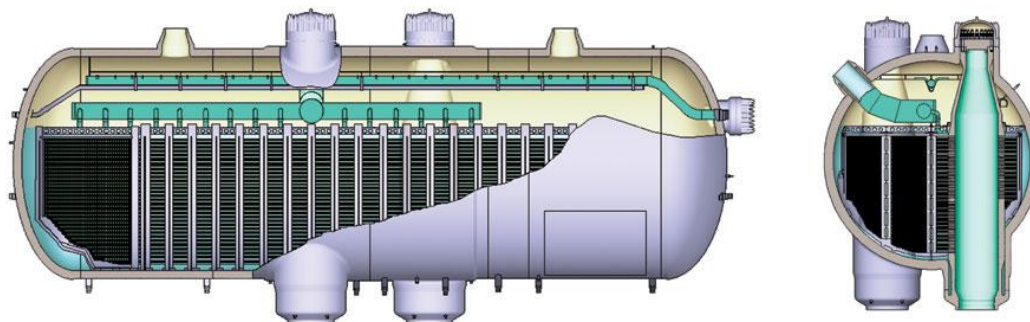


Рисунок 1 - Общий вид парогенератора ПГВ-1500

Работоспособность парогенераторов является одной из важнейших составляющих безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС. История развития конструкции и эксплуатации парогенераторов, как в России, так и за рубежом, показывает, что определяющей для ресурса ПГ является проблема целостности теплообменных труб (ТОТ) [1].

Теплообменные трубы в парогенераторе работают в очень жестких условиях:

- давление в первом контуре 16,2 МПа, во втором контуре 7,00 МПа;
- температура теплоносителя в реакторе на входе 298,6°C, на выходе 329,7°C;
- паропроизводительность 1654 т/ч [2].

Выход теплообменных труб из строя в процессе эксплуатации приводит к длительной остановке всего агрегата и к значительным экономическим убыткам.

В основном повреждения металла ТОТ горизонтальных ПГ вызываются коррозионными процессами под слоем отложений [3]. Активно развивающиеся процессы дефектообразования на внешней поверхности ТОТ приводят в конечном итоге к протечкам из первого контура. Для исключения возможности протечек необходим периодический контроль дефектности металла ТОТ.

Для оценки состояния теплообменных труб ПГ в процессе эксплуатации проводится контроль целостности труб методом вихретокового контроля (ВТК) [4]. По результатам ВТК производится превентивное глушение дефектных труб, что позволяет избежать во время эксплуатации возможного развития имеющегося дефекта до сквозного

и, соответственно, внепланового останова реакторной установки. По достижению определенного числа заглушенных теплообменных труб требуется замена парогенератора.

Многочисленные исследования отработавших срок теплообменных труб в горизонтальных парогенераторах показывают, что на ТОГ имеются дефекты следующего типа:

- коррозионная язва (одиночное повреждение, глубина которого приблизительно равна ширине);
- коррозионное пятно (повреждение, имеющее малую глубину и большую площадь);
- коррозионный питтинг (скопление малых повреждений, наподобие язвы, но значительно меньшего размера);
- коррозионная трещина (повреждение, характеризующееся образованием глубокой, ветвистой трещины, широкой вблизи поверхности).

Кроме перечисленных основных видов, встречаются скопления однотипных вышеуказанных коррозионных повреждений (например, группа трещин – растрескивание), а также их взаимное сочетание. Среди различных сочетаний коррозионных повреждений наиболее часто встречаются язва с магистральной трещиной и коррозионное пятно с язвой. Основные виды выявленных повреждений представлены на рисунке 2 [5].

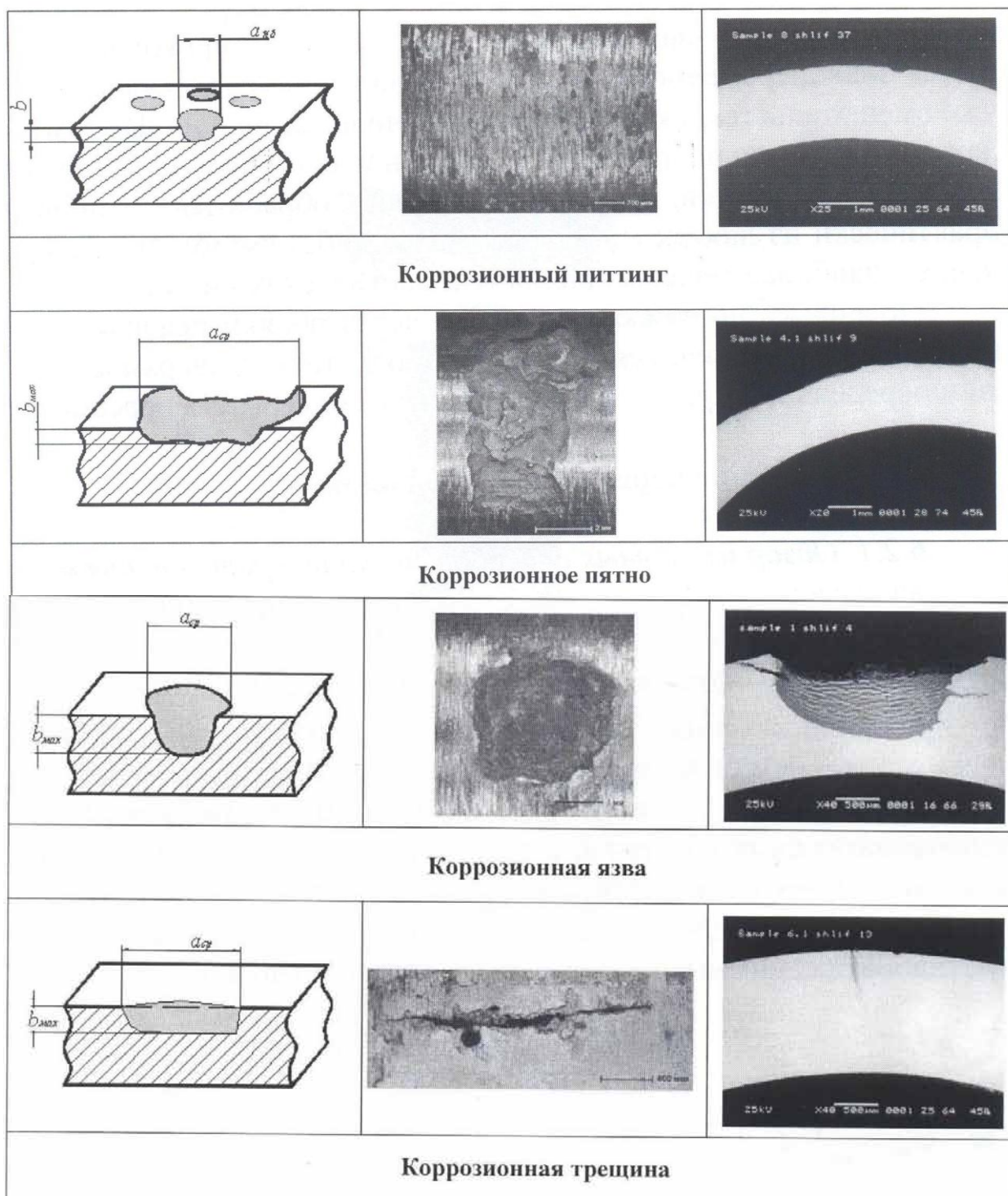


Рисунок 2 Основные виды коррозионных дефектов

На рисунке 3 показан типичный вид наружной поверхности ТОГ после 5-6 лет эксплуатации парогенератора [6].

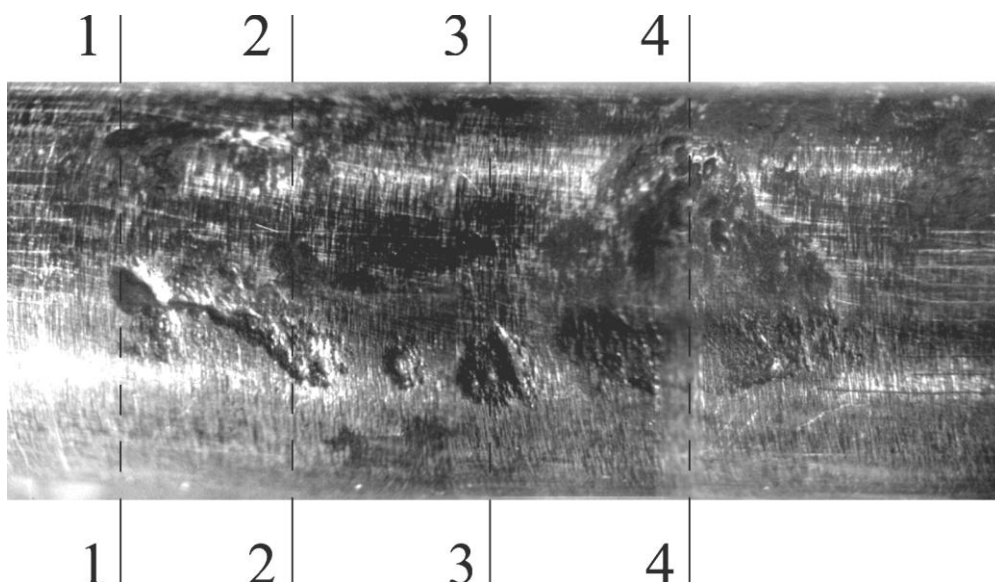
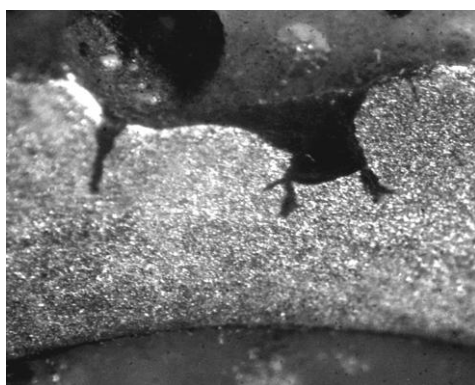
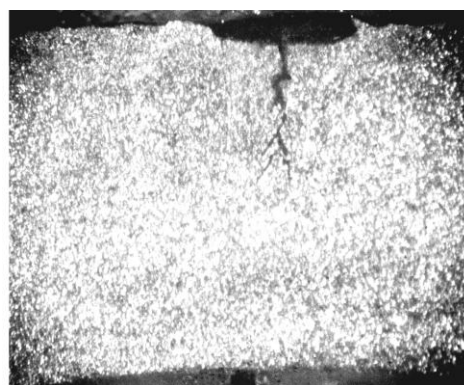


Рисунок 3 – Поверхность ТОТ с коррозионными дефектами: 1-4 – сечения изготовления металлографических шлифов.

Вид дефектов на шлифах, выполненных в сечениях 1 и 2 (рисунок 3) показан на рисунке 4.



а



б

Рисунок 4 – коррозионные дефекты: *а* – в сечении 1; *б* – в сечении 2 (рисунок 3)

Необходимо отметить, что язвы и трещины составляют большинство коррозионных дефектов, встречающихся на теплообменных трубах ПГ. Язвенная коррозия представляет собой один из опасных видов коррозионного разрушения, характерного для пассивного состояния металла и сплавов. При протекании этого вида коррозии отдельные ограниченные участки металла растворяются со значительной скоростью, причем вся остальная поверхность может оставаться в пассивном состоянии – почти не затронутой коррозией. Это приводит к образованию глубоких поражений – язв и трещин. Точечные повреждения (питтинги) имеют очень малый диаметр. Часто точечные повреждения являются зародышами язвенных повреждений. Коррозионные пятна имеют особенность в том, что повреждение развивается преимущественно по поверхности металла теплообменной трубы ПГ и характеризуется большой площадью поражения при

малой глубине. На отдельных участках коррозионных пятен возможно развитие глубоких язвенных повреждений.

Коррозионному растрескиванию подвержены многие стали и сплавы, в том числе и сталь 08X18H10T. При работе парогенератора на мощности в теплообменных трубах действуют как внутренние, так и внешние напряжения [7]. Внутренними напряжениями являются остаточные напряжения, возникающие при производстве труб. Внешними являются рабочие, возникающие за счет перепада давления между первым и вторым контуром и термические, возникающие за счет температурного градиента в стенке трубы.

В условиях работы парогенератора на наружной поверхности теплообменных труб возникают растягивающие рабочие и термические напряжения, которые суммируются с остаточными напряжениями. Поэтому растягивающие остаточные напряжения на наружной поверхности труб увеличивают суммарные действующие напряжения, что приводит к снижению их коррозионной стойкости. Сжимающие остаточные напряжения наоборот уменьшают суммарные действующие напряжения, что способствует увеличению коррозионной стойкости труб.

Постоянные растягивающие напряжения (внешние и внутренние) увеличивают скорость общей коррозии металла примерно пропорционально их величине. При этом происходит, главным образом, местная коррозия или коррозионное растрескивание [7]. На рисунке 5 приведен пример распределения по стенке ТОТ напряжений действующих в процессе эксплуатации [8]. Рисунок 5 хорошо иллюстрирует принцип суперпозиции всех напряжений, действующих в стенке ТОТ.

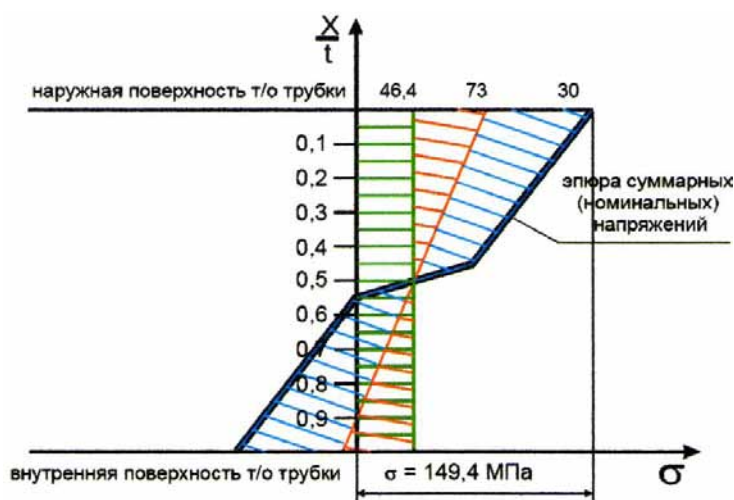


Рисунок 5 – Эпюра суммарных напряжений, действующих в стенке ТОТ в процессе эксплуатации

Коррозионное растрескивание металлов характеризуется образованием трещин в плоскостях, перпендикулярных направлению растягивающих напряжений. Трещины

могут быть ориентированы как в осевом, так и в тангенциальном направлении. Это связано с действием в стенке трубы тангенциальных и продольных остаточных напряжений соответственно (рисунок 6).

Объединение нескольких дефектов может приводить к образованию единой трещины критического размера, раскрытие которой приводит к разрыву теплообменной трубы и влечет за собой выход теплоносителя из первого контура во второй со значительным расходом. На рисунке 6,*а* показан пример вырезанного дефектного участка теплообменной трубы. Геометрические размеры трещины - длина 73 мм, максимальное раскрытие до 2,3 мм; перемычки металла в трещине говорят о том, что три независимые трещины слились в одну [9].

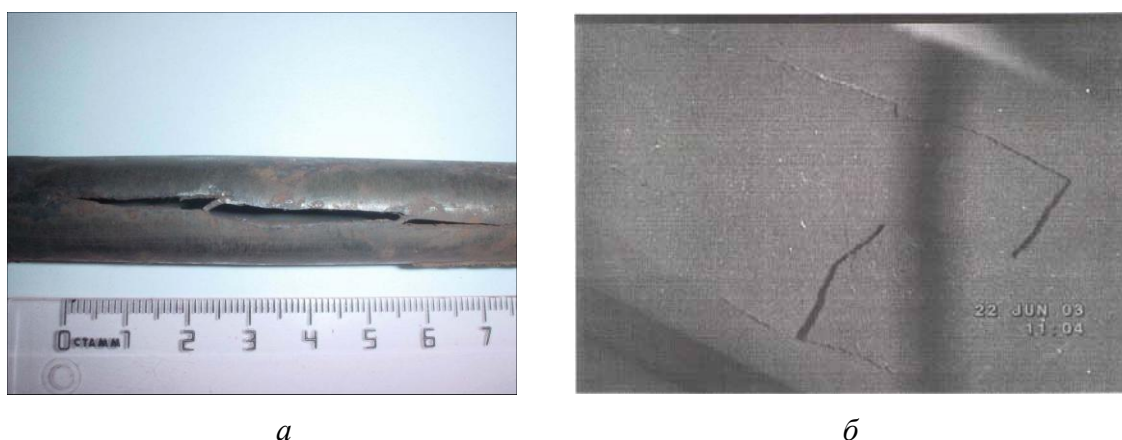


Рисунок 6 – Внешний вид дефектов теплообменных труб: *а* – продольная трещина; *б* – поперечные трещины

Механизмы зарождения и развития повреждений и коррозионного растрескивания теплообменных труб парогенераторов достаточно обстоятельно изучены сотрудниками ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург) и ФГУП ОКБ «Гидропресс» (Подольск). На основании обобщения экспериментальных данных и опубликованных результатов исследований коррозионной стойкости сталей аустенитного класса процесс коррозионного повреждения ТОТ ПГ можно разделить на нескольких последовательных обязательных стадий с характерными для каждой стадии механизмами деградации труб:

I – Рост отложений продуктов коррозии на ТОТ до критических значений удельной загрязненности.

II – Накопление хлоридов и других активаторов под отложениями до критических концентраций, вызывающих зарождение питтингов и коррозионное растрескивание при наличии окислителей.

III – Зарождение питтингов при критической концентрации хлоридов и окислителей.

IV – Рост питтингов при транспортировке окислителей в зону реакции.

V – Зарождение коррозионных трещин при активном локальном пластическом деформировании микрообъемов металла ТОТ.

VI – Рост коррозионных трещин до момента глушения ТОТ.

Структурная схема механизмов повреждения теплообменных труб при эксплуатации парогенераторов типа ПГВ представлена на рисунке 7.

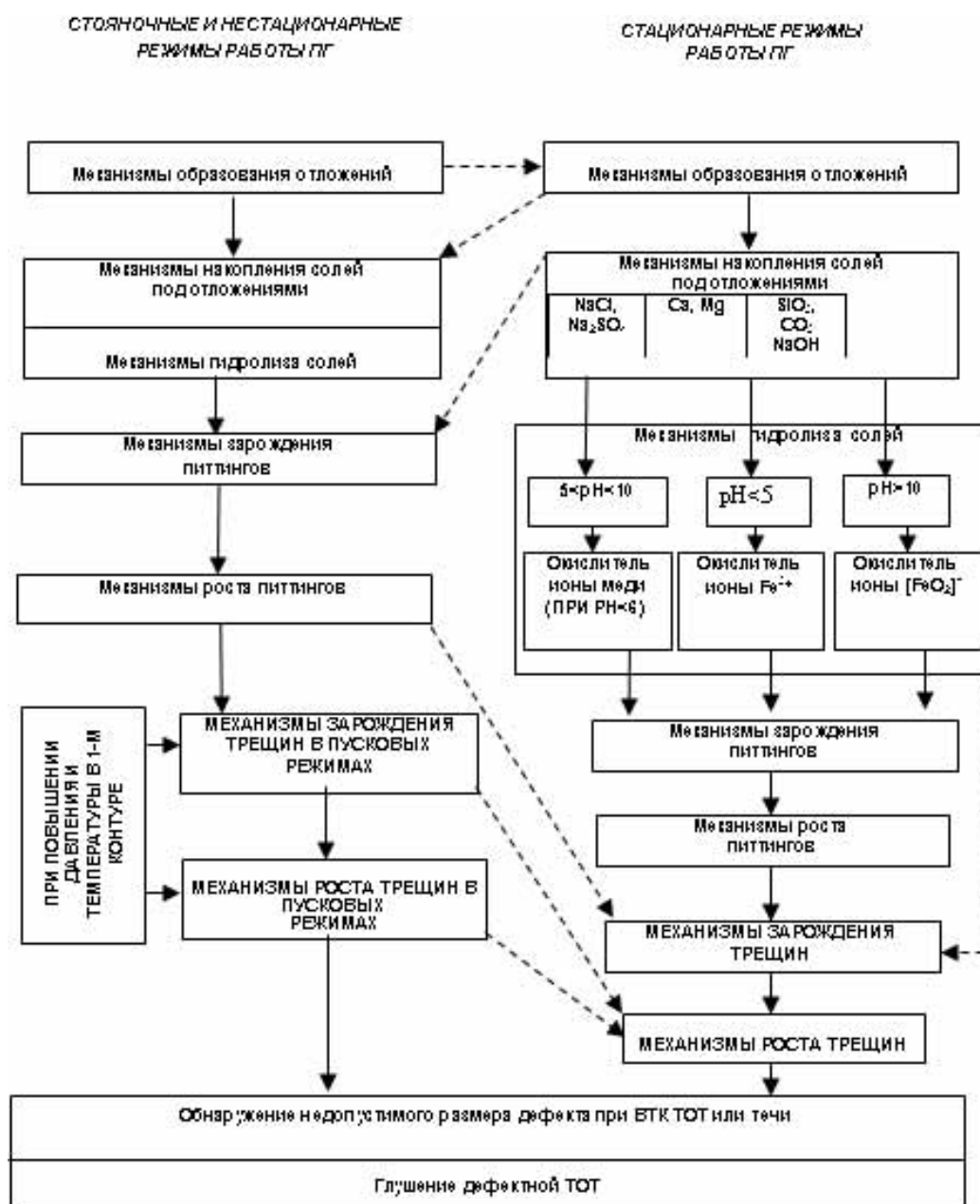


Рисунок 7 – Структурная схема механизмов повреждения теплообменных труб при различных режимах эксплуатации парогенераторов типа ПГВ

Исходя из приведенной на рисунке 7 схемы механизмов повреждения ТОТ, все модели коррозионного повреждения сводятся к стадиям зарождения и роста трещин. Зарождение в большей степени объясняется межкристаллитной и питтинговой коррозией под слоем отложений, а рост трещин обусловлен наличием растягивающих напряжений в стенке трубы.

Активная пластическая деформация в вершинах острых дефектов возникает под действием суммарных напряжений, включающих остаточные напряжения, мембранные напряжения (от перепада давления между I и II контуром) и термические напряжения (в результате разности температур внутренней и наружной стенки ТОТ). Хотя расчетная величина максимальных рабочих растягивающих напряжений в теплообменной трубе при работе ПГ не превышает половины от условного предела текучести труб из стали 08X18H10T (~280-300 МПа), с учетом концентрации напряжений в острых вершинах на дне дефектов (питтингов, язв или острых рисок) локальные растягивающие напряжения при суммировании с остаточными напряжениями могут превысить предел текучести металла труб даже при уровнях мощности ПГ значительно ниже 100%.

Некоторыми авторами выделяются периоды разрушения ТОТ в зависимости от времени эксплуатации. При коррозионном растрескивании металла можно выделить три основных периода в разрушении металла [3].

Инкубационный период – это процесс постепенного образования на поверхности металла микрокоррозионных трещин под воздействием коррозионной среды и локализации растягивающих напряжений. Наиболее благоприятными условиями для зарождения микротрещин являются такие, при которых и растягивающие напряжения, и коррозионный процесс локализуются на отдельных участках поверхности металла. В сильно агрессивных средах, вызывающих равномерную общую коррозию, вероятность коррозионного растрескивания гораздо меньше, чем в средах, которые вызывают местное разрушение металла.

Развитие коррозионной трещины происходит при совместном действии коррозионной среды и растягивающих напряжений в металле. При этом наличие растягивающих напряжений является необходимым условием коррозионного растрескивания. Рост трещины можно рассматривать как непрерывный электрохимический процесс, в значительной степени ускоряемый наложенными напряжениями растяжения (рисунок 8).

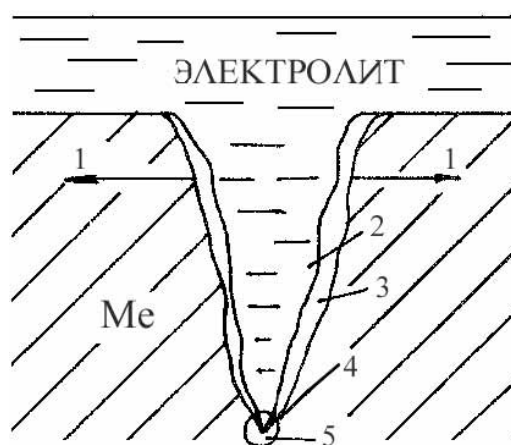


Рисунок 8 – Схема коррозионной трещины: 1 – направления растягивающих напряжений; 2 – трещина, заполненная электролитом; 3 – оксидная пленка (катод коррозионной пары); 4 – непрерывно обновляемое острие трещины (анод коррозионной пары); 5 – максимально напряженная зона металла

На боковой поверхности трещины образуется оксидная пленка продуктов коррозии. Острая часть трещины, развивающаяся под воздействием концентрирующихся на этом участке напряжений растяжения, постоянно обновляется, поэтому не защищена оксидными пленками. Возникает коррозионная пара, катодом которой служит вся боковая поверхность трещины, а анодом – острие трещины.

Коррозионная пара очень эффективна, так как и катод, и анод практически полностью неполяризуемы. В таких условиях могут возникать высокие линейные скорости роста трещины от 1 до 10 мм/ч.

Конечное разрушение металла наступает, когда, из-за все большей локализации напряжений, трещина начинает ускорять свой рост во времени. Конечное разрушение металла происходит при преимущественном влиянии механического фактора, т.е. растягивающих напряжений. Снижение коррозионной стойкости из-за действия растягивающих напряжений подтверждено опытами, проведенными в работах [10].

Из изученных литературных сведений о коррозионном растрескивании можно сделать вывод, что для зарождения и роста коррозионных трещин в теплообменных трубах помимо агрессивной среды необходимо одновременное воздействие следующих факторов:

- наличие структурной неоднородности металла;
- наличие поверхностных дефектов в виде рисок, вмятин и т.п.;
- наличие остаточных растягивающих напряжений в трубе.

Необходимо отметить, что исследованием структурной неоднородности и поверхностных дефектов последнее время уделяется большое внимание. Производители

постоянно совершенствуют технологию производства ТОТ в этом направлении. Причины же и технологические факторы, влияющие на формирование остаточных напряжений в трубах, до недавнего времени оставались не изученными. Об этом свидетельствует тот факт, что в нормативных документах на трубы до сих пор отсутствуют требования к величине и знаку остаточных напряжений, что создает значительные трудности для изучения остаточных напряжений в трубах.

1. Рациональная методика анализа уровня и распределения остаточных напряжений в стенке трубы

Как уже говорилось, одним из основополагающих вопросов в области остаточных напряжений является вопрос, связанный с методами точного и достоверного их измерения. В главе 1 диссертационной работы были подробно описаны методы измерения остаточных напряжений в металлопродукции. Ряд методик по расчету полей остаточных напряжений основанных на методе «расчленения» нашел широкое применение, однако все методики имеют свои преимущества и недостатки.

Следует помнить, что на развитие коррозионного растрескивания в основном влияет главное нормальное напряжение σ_{11} , определить которое кольцевой пробой невозможно. Кроме тангенциальных напряжений $\sigma_{\phi\phi}$ в стенке трубы действуют всегда напряжения σ_{zz} , σ_{rr} и σ_{rz} . Главные напряжения, или хотя бы максимальные из них, могут быть определены, если определен тензор напряжений. Анализ напряженного состояния металла проволоки после ее полной силовой и тепловой разгрузки показывает [11], что в поверхностных слоях почти всегда $\sigma_{zz} > \sigma_{\phi\phi}$ и это напряжения, как правило, положительны. В этом случае $\sigma_{rr} < 0$. Вряд ли можно ожидать существенного различия в закономерностях возникновения остаточного напряженного состояния труб и проволоки. Если предположить, что и в трубах $\sigma_{zz} > \sigma_{\phi\phi}$, то результаты измерения напряжений кольцевой пробой непредставительны и не могут характеризовать склонность металла труб к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Для получения достоверной картины напряженного состояния целесообразно сочетать при анализе различные методы, например, механические, рентгенографические и математические. Последние позволяют по нескольким экспериментально замеренным остаточным напряжениям (тангенциальных $\sigma_{\phi\phi}$ или продольных σ_{zz}) определить остальные компоненты тензора напряжений, удовлетворяя дифференциальным

уравнениям равновесия, и затем уже рассчитать главные напряжения, по которым и прогнозировать коррозионную стойкость металлоизделий.

Для определения всего поля остаточных напряжений в стенке трубы после завершения цикла ее обработки можно воспользоваться модифицированной методикой расчета компонентов тензора напряжений, предложенной и запатентованной авторами [13]. Из решения осесимметричной задачи теории упругости для остаточных напряжений в трубах получены формулы расчета радиальных σ_{rr} , тангенциальных $\sigma_{\varphi\varphi}$ и осевых σ_{zz} остаточных напряжений:

$$\sigma_{rr} = -a_0(R_1 - r)(r - R_2); \quad (1)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = a_0[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]; \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = a_0\mu[2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]; \quad (3)$$

где R_1 и R_2 – соответственно наружный и внутренний радиусы сечения трубы;

r – радиальная координата; $r \in [R_1, R_2]$;

μ – коэффициент Пуассона материала трубы.

Параметр a_0 зависит от технологических условий изготовления трубных изделий и может быть определен из формулы (2) для экспериментально найденного тангенциального остаточного напряжения $\sigma_{\varphi\varphi}^*$ на внешней поверхности трубы, то есть при $r = R_1$.

$$a_0 = \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^*}{R_1^2(1 - \bar{R})}, \quad (4)$$

где $\bar{R} = R_2/R_1$ – безразмерный параметр, характеризующий относительную толщину стенки трубы.

После подстановки значения a_0 в формулы σ_{ii} получают распределение главных остаточных напряжений в объёме.

$$\sigma_{rr} = -\frac{\sigma_{\varphi\varphi}^*(R_1 - r)(r - R_2)}{R_1^2(1 - \bar{R})}; \quad (5)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^*[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2(1 - \bar{R})}; \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^*\mu[2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2(1 - \bar{R})}. \quad (7)$$

Предложенный способ использован для определения технологических остаточных напряжений в тонкостенных циркониевых холоднодеформированных трубах, которые применяются для каналов водо-водяных и кипящих атомных реакторов. В лаборатории ОАО «Чепецкий механический завод» с применением автоматического дифрактометрического комплекса определены экспериментальные значения тангенциальных остаточных макронапряжений на поверхности холоднокатаной трубы из сплава Э125 с внешним и внутренним диаметрами трубы 88 и 79,5 мм, что соответствует $\bar{R} = 0,9$, которые составляют +(68...116) МПа. Коэффициент Пуассона для данного сплава принят равным $\mu=0,34$. В таблице 1 приведены результаты расчета остаточных напряжений в трубе с внешним и внутренним радиусами 44 и 39,75 мм соответственно для экспериментально определенного $\sigma_{\phi\phi}=116$ МПа [13].

Таблица 1

Результаты расчета остаточных напряжений

r , мм	σ_r , МПа	σ_z , МПа	σ_{ϕ} , МПа
39,75	0	-35,6305	-104,79545
40,5	-1,62834	-24,5973	-70,716578
41,25	-255882	-12,615	-34,544118
42	-2,79144	0,316364	3,7219251
42,75	-2,3262	14,19682	44,081551
43,5	-1,1631	29,02636	86,534759
44	0	39,44	116

В данном случае основной проблемой следует считать определение поверхностного тангенциального остаточного напряжения $\sigma_{\phi\phi}^*$ методом разрезных колец. По результатам замера деформации продольно разрезанного кольца, вырезанного из трубы, нельзя судить о величине напряжения в поверхностных слоях, поскольку деформация кольца является результатом уравнивания всей эпюры тангенциальных остаточных напряжений.

Следует учитывать, что при симметричном распределении тангенциальных напряжений (рисунок 9, в) кольцо после продольной разрезки может сохранять диаметр, хотя в поверхностных слоях трубы могут присутствовать достаточно высокие напряжения, как сжатия, так и растяжения. Наконец, даже правильный замер поверхностных тангенциальных касательных напряжений не дает представления о

стойкости металла против МКК, поскольку решающее влияние на раскрытие микротрещин оказывают главные напряжения, определить которые кольцевой пробой принципиально невозможно.

В физически обоснованном методе разрезных колец предусматриваются кроме вырезки и разрезки по образующей кольца испытываемой трубы стравливание или механическое удаление поверхностных слоев металла. При этом следует учитывать дополнительные окружные напряжения, возникающие при вырезке кольца, при разрезке кольца вдоль образующей и при стравливании (механическом удалении) всех предыдущих слоев. После разрезки или снятия слоя в рассматриваемой точке тела изменяются остаточные напряжения. Эти изменения связаны с тем, что на обнажаемых поверхностях как бы прикладываются обратные остаточные напряжения, вызывающие изменение напряженного состояния во всех точках оставшейся части кольца. В методе Н.Н. Давиденкова производится отрезка достаточно длинного участка трубы l , что дает возможность при $l > 12\sqrt{R_{\text{ср}}S}$, где $R_{\text{ср}}$ – средний радиус стенки трубы, можно пренебречь дополнительными окружными напряжениями, возникающими в результате отрезки трубы, и остается учесть только дополнительные напряжения от продольной разрезки и от удаления слоев. Однако конечное выражение для расчета $\sigma_{\text{фф}}$, полученное Н.Н. Давиденковым, трудно использовать на практике, так как для определения интегрируемых функций требуется многократное последовательное удаление слоев металла с цилиндрических поверхностей образца трубы. Возникают сложно решаемые проблемы удаления слоев без нарушения геометрии трубы, что является источником дополнительных ошибок в определении остаточных тангенциальных напряжений даже в тонком поверхностном слое.

Учитывая отмеченную неопределенность при экспериментальном нахождении $\sigma_{\text{фф}}^*$ методом разрезных колец, систему уравнений σ_{ii} целесообразно преобразовать для обеспечения возможности использования в качестве исходной экспериментальной информации значения продольного (осевого) остаточного напряжения σ_{zz}^* на наружной поверхности трубы. Для определения этого напряжения может быть применен метод стравливания, хорошо зарекомендовавший себя при замере остаточных напряжений в сечении прутков и проволоки [14].

Возможны следующие варианты распределения продольных остаточных напряжений в стенке трубы (рисунок 9): на наружной поверхности трубы – растягивающие напряжения, а на внутренней – сжимающие (рисунок 9, а); на наружной

поверхности – сжимающие, на внутренней – растягивающие напряжения (рисунок 9, б); на обеих поверхностях растягивающие напряжения, в центральных слоях стенки – сжимающие (рисунок 9, в); на обеих поверхностях сжимающие напряжения, а внутри стенки – растягивающие.

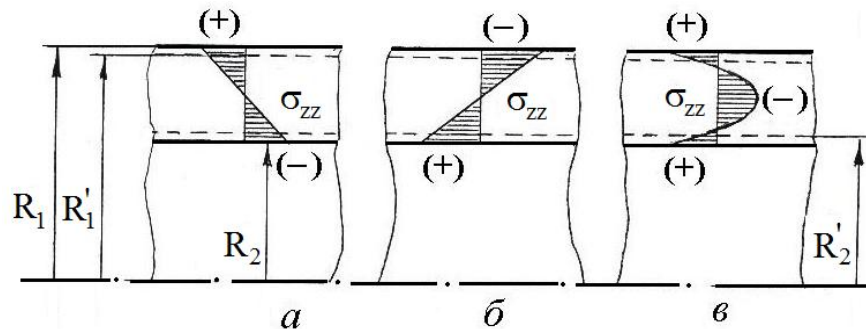


Рис. 9. Варианты возможного распределения осевых остаточных напряжений в стенке трубы

Аналогичная ситуация по распределению тангенциальных остаточных напряжений. Радиальные напряжения в стенке трубы, как правило, являются сжимающими, за исключением случаев специальной обработки.

Если стравливается наружный поверхностный слой трубы и радиус ее меняется с R_1 до R'_1 (см. рисунок 9), то происходит некоторая разгрузка трубы по остаточным напряжениям и длина образца трубы изменяется на величину Δl . При этом положительное значение $+\Delta l$ соответствует удлинению образца и наличию в поверхностном слое положительных (растягивающих) напряжений σ_{zz}^* . Если Δl отрицательно, то образец укорачивается, что означает наличие в поверхностном слое отрицательных (сжимающих) напряжений σ_{zz}^* , которые после замера радиуса R'_1 и длины образца $l + \Delta l$ после завершения травления могут быть определены по формуле:

$$\sigma_{zz}^* = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1'^2 - R_2^2}{R_1^2 - R_1'^2}, \quad (8)$$

где R'_1 – радиус наружной поверхности трубы после стравливания слоя толщиной $R_1 - R'_1$.

При стравливании слоя металла с внутренней поверхности внутренний радиус увеличивается с R_2 до R'_2 . Образец трубы также изменяет длину на Δl , и величина остаточного продольного напряжения во внутреннем поверхностном слое определяется по формуле

$$\sigma_{zz}^{**} = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1^2 - R_2'^2}{R_2'^2 - R_2^2}, \quad (9)$$

где R_2' – радиус внутренней поверхности трубы после стравливания слоя толщиной $R_2' - R_2$.

Найденные значения σ_{zz}^* или σ_{zz}^{**} являются усредненными в объеме стравливаемого слоя. Поэтому о величине поверхностных напряжений можно судить только при малой толщине стравливаемых слоев металла. Однако при уменьшении величины $R_1 - R_1'$ или $R_2' - R_2$ возникают технические проблемы точного замера диаметров и удлинения трубы.

Для расчета поля напряжений σ_{ii} в объеме стенки трубы, используя экспериментально найденное значение σ_{zz}^* из уравнения (8), можно определить при $r = R_1$

$$a_0 = \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}, \text{ или при } r = R_2 \quad a_0 = \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)},$$

и подставив его в уравнения σ_{ii} , найти компоненты тензора напряжений для случая $R_1' < R_1$

$$\sigma_{rr} = -\frac{\sigma_{zz}^* (R_1 - r)(r - R_2)}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\sigma_{zz}^* [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})}; \quad (11)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{zz}^* [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1^2 (1 - \bar{R})}, \quad (12)$$

или для случая $R_2' > R_2$

$$\sigma_{rr} = -\frac{\sigma_{zz}^{**} (R_1 - r)(r - R_2)}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}; \quad (13)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = -\frac{\sigma_{zz}^{**} [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{\mu R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}; \quad (14)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\sigma_{zz}^{**} [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]}{R_1 R_2 (\bar{R} - 1)}. \quad (15)$$

Формулы для расчета распределений напряжений $\sigma_{ii}(r)$ по экспериментально найденным значениям σ_{zz}^* или σ_{zz}^{**} пригодны для ситуаций, показанных на рисунках 9, а и 9, б. В тех же случаях, когда на обеих поверхностях возникают однозначные продольные напряжения (см. рисунок 9, в), распределения напряжений $\sigma_{ii}(r)$ по толщине стенки трубы могут быть получены только в рамках принятых гипотез при удовлетворении условиям равновесия. Когда же напряжения в наружных и внутренних слоях стенки трубы противоположны по знаку, распределения $\sigma_{zz}(r)$ и $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$, рассчитанные по формулам $\sigma_{ii}(r)$, близки к линейным.

Труба диаметром 20×2 мм из стали 08X18H10T после безоправочного волочения подвергнута травлению с наружной поверхности в специальной лабораторной установке. Базовая длина, на которой осуществлено снятие слоя толщиной $\Delta r=0,2$ мм, составляла $l=1100$ мм. После травления и охлаждения образец трубы удлинился на величину $\Delta l=0,12$ мм, что свидетельствует о растягивающих продольных остаточных напряжениях в удаленном слое. Это напряжение, рассчитанное по формулам (8), условно принимается за поверхностное: $\sigma_{zz|r=R_1} = \sigma_{zz}^* = 185$ МПа; $\sigma_{\varphi\varphi|r=R_1} = \sigma_{zz}^* / \mu = 617$ МПа. Распределение σ_{zz} и $\sigma_{\varphi\varphi}$ по толщине стенки трубы показаны на рисунок 10 (кривые 1).

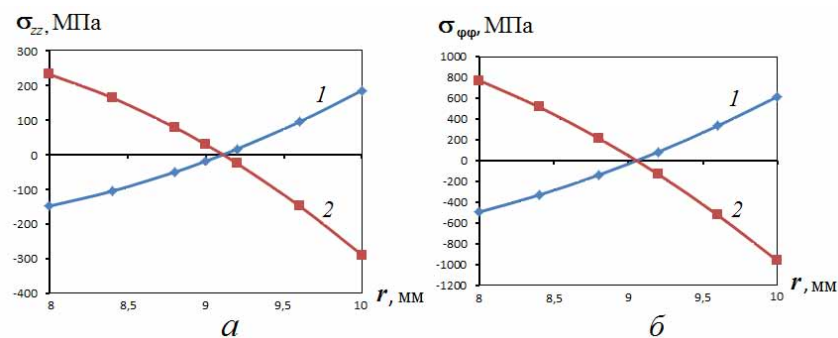


Рисунок 10 – Распределение напряжений σ_{zz} (а) и $\sigma_{\varphi\varphi}$ (б) по толщине стенки трубы

У второго образца трубы, полученной на ХПТР, удален слой металла $\Delta r=0,2$ мм с внутренней поверхности. При этом удлинение составило $\Delta l=0,135$ мм, что свидетельствует о растягивающих продольных напряжениях $\sigma_{zz}^{**}=231$ МПа (в соответствии с формулой (18)); $\sigma_{\varphi\varphi|r=R_2} = \sigma_{zz}^{**} / \mu = 772$ МПа. На рисунке 10 показаны распределения напряжений σ_{zz} и $\sigma_{\varphi\varphi}$ по толщине стенки трубы при растягивающих продольных напряжениях на внутренней поверхности (кривые 2). Полученные

распределения напряжений удовлетворяют условиям равновесия продольных сил для $\sigma_{zz}(r)$ и крутящих моментов для $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$.

Распределения напряжений σ_{rr} по толщине стенки трубы построены с использованием экспериментально полученных значений σ_{zz}^* и σ_{zz}^{**} и представлены на рисунке 11, где отрицательные радиальные напряжения соответствуют случаю стравливания слоя Δr с наружной поверхности (кривая 1), а положительные – стравливанию внутреннего слоя. В обоих случаях σ_{zz}^* и σ_{zz}^{**} положительны, а $\sigma_{rr}(r)$ меняют знак на противоположный. Естественным, что $\sigma_{rr}|_{r=R_1} = 0$.

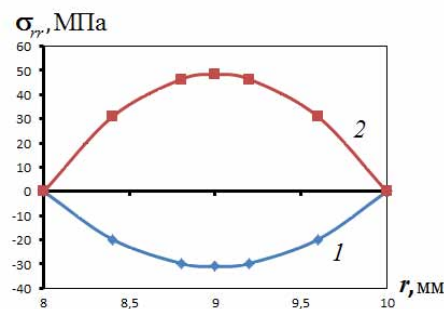


Рисунок 11– Распределения σ_{rr} в стенке трубы после волочения (1) и холодной прокатки (2), построенные по экспериментально

полученным значениям σ_{zz}^* и σ_{zz}^{**}

Когда на поверхностях трубы присутствуют однозначные остаточные напряжения растяжения или сжатия, приходится использовать определенные гипотезы распределения напряжений по радиусу трубы, поскольку истинное распределение определить невозможно ни экспериментально, ни теоретически. Как известно, для материалов кристаллического строения эффективно используется рентгеновская тензометрия [15]. При использовании рентгеновского способа на исследуемое изделие воздействуют рентгеновскими лучами, направленными под разными строго заданными углами. Последующая расшифровка рентгенограмм позволяет рассчитать разность главных напряжений $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ на поверхности или даже каждое из главных напряжений σ_{11} и σ_{22} . К недостаткам рентгеновского метода относятся его ограниченные возможности вследствие того, что напряжения определяются только на поверхности изделия, то есть невозможно получить полную картину распределения остаточных напряжений по всему объему и, в частности, по толщине стенки трубы. Кроме того, невозможно определить третье главное напряжение σ_{33} , в частности радиальное, поскольку на поверхности это

напряжение равно нулю, и оно не влияет на рентгенограмму. В то же время известно, что по мере удаления от поверхности оно может достигать большой величины, а при оценке прочности труб σ_{rr} играет большую роль. Автор [15] отмечает, что даже при достаточно точном замере углов отражения рентгеновских лучей это не дает уверенности, что полученные результаты могут быть использованы для достаточно точного определения напряжений первого рода. В практических задачах представляет интерес определение именно макронапряжений, так как только с их помощью может быть проведена оценка влияния остаточных напряжений на эксплуатационные свойства металлоизделий. Все другие экспериментальные методы не дают надежных результатов из-за дополнительных деформаций и искажения формы образцов в процессе механического или химического последовательного удаления слоев металла.

В настоящей работе использована гипотеза параболического распределения остаточных напряжений по толщине стенки трубы, что иллюстрируется схемой на рисунке 12.

Напряжения σ_{zz}^* и σ_{zz}^{**} определяются описанным способом, а $\sigma_{\varphi\varphi}^*$ и $\sigma_{\varphi\varphi}^{**}$ находятся из уравнений $\sigma_{\varphi\varphi}(\sigma_{zz}^*)$ и $\sigma_{\varphi\varphi}(\sigma_{zz}^{**})$ при $r = R_1$ и $r = R_2$ соответственно, то есть $\sigma_{\varphi\varphi}^* = \sigma_{zz}^* / \mu$ и $\sigma_{\varphi\varphi}^{**} = \sigma_{zz}^{**} / \mu$.

Распределения напряжений по толщине стенки трубы представлены уравнениями

$$\sigma_{zz} = a_z r^2 - b_z r - c_z,$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = a_\varphi r^2 - b_\varphi r - c_\varphi,$$

коэффициенты аппроксимации которых находятся из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ii}^* &= a_i R_1^2 + b_i R_1 + c_i \\ \sigma_{ii}^{**} &= a_i R_2^2 + b_i R_2 + c_i \\ \sigma_{0i} &= a_i r_{0i}^2 + b_i r_{0i} + c_i \end{aligned} \right\}, \text{ где } i = z \text{ или } \varphi.$$

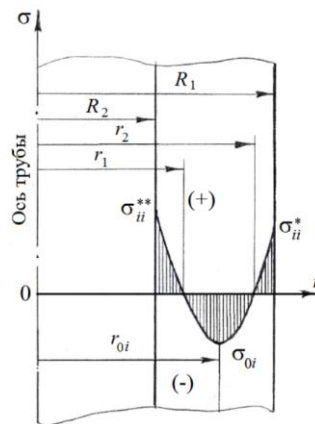


Рисунок 12 – Расчетная схема распределения остаточных напряжений по толщине стенки трубы при однозначных поверхностных напряжениях

Координаты r_{0i} , σ_{0i} определяют положение вершины параболы и определяются при расчете эпюр $\sigma_{zz}(r)$ и $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$ из условий равновесия остаточных напряжений в объеме трубы. Коэффициенты аппроксимации с точностью до неизвестных координат вершины параболы находятся из выражений:

$$a_i = k_{i1} - b_i k_{i3}; \quad b_i = (k_{i1} - k_{i2}) / (k_{i3} - k_{i4}); \quad c_i = \sigma_{ii}^{**} - a_i R_i^2 - b_i R_i;$$

где

$$k_{i1} = \frac{\sigma_{ii}^{**} - \sigma_{ii}^*}{R_2^2 - R_1^2}; \quad k_{i2} = \frac{\sigma_{0i} - \sigma_{ii}^*}{r_{0i}^2 - R_1^2}; \quad k_{i3} = \frac{R_2 - R_1}{R_2^2 - R_1^2}; \quad k_{i4} = \frac{r_{0i} - R_1}{r_{0i}^2 - R_1^2}.$$

На значения координаты r_{0i} накладывается условие $d\sigma_{ii}/dr=0$, из которого следует:

$$a_{0i} = -b_i/2a_i.$$

Уравнение равновесия напряжений σ_{zz} в поперечном сечении трубы, составленное в соответствии с обозначениями на рисунке 12, имеет вид:

$$\int_{R_2}^{r_1} \sigma_{zz}(r) r dr + \int_{r_2}^{R_1} \sigma_{zz}(r) r dr + \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{zz}(r) r dr = 0.$$

После интегрирования уравнение равновесия, представленное в форме

$$\frac{a_z}{4} (R_1^4 - R_2^4) + \frac{b_z}{3} (R_1^3 - R_2^3) + \frac{c_z}{2} (R_1^2 - R_2^2) = 0,$$

позволяет найти σ_{0z} последовательными приближениями по r_{0z} . При этом в качестве первого приближения принято значение

$$r_{0z}' = \frac{R_2 + R_1 \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\sigma_{zz}^*}}{1 + \frac{\sigma_{zz}^{**}}{\sigma_{zz}^*}}.$$

В качестве примера рассмотрено построение эпюры $\sigma_{zz}(r)$ в стенке трубы диаметром 20 мм и толщиной стенки 2 мм, у которой на наружной поверхности продольное остаточное напряжение $\sigma_{zz}^* = 120$ МПа, а на внутренней $\sigma_{zz}^* = 60$ МПа. Равновесие продольных сил относительно оси трубы достигается при $\sigma_{0z} = -50,17$ МПа, а эпюра напряжений описывается уравнением:

$$\sigma_{zz} = 138,5 r^2 - 2464 r + 10903.$$

При этом $r_{0z} = 8,89$ мм, $r_1 = 8,29$ мм, $r_2 = 9,49$ мм. Распределение $\sigma_{zz}(r)$ для рассмотренного случая графически представлено на рисунке 13.

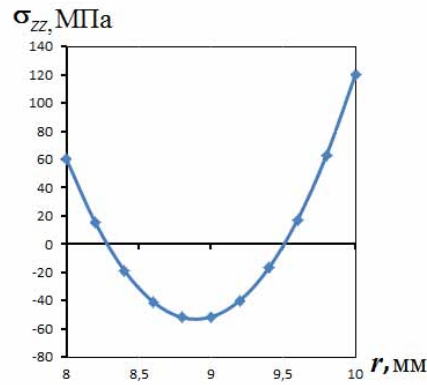


Рисунок 13 – Распределение продольных остаточных напряжений

в стенке трубы при $\sigma_{zz}^* = 120$ МПа и $\sigma_{zz}^{**} = 60$ МПа

Распределение тангенциальных напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$ строится при удовлетворении уравнению равновесия моментов окружных сил относительно оси трубы

$$\int_{R_2}^{r_1} \sigma_{\varphi\varphi}(r) r^2 dr + \int_{r_2}^{R_1} \sigma_{\varphi\varphi}(r) r^2 dr + \int_{r_1}^{r_2} \sigma_{zz}(r) r^2 dr = 0.$$

Координаты вершины параболы $(\sigma_{0\varphi}, r_{0\varphi})$ находятся аналогичной процедурой из уравнения:

$$\frac{a_{\varphi}}{5} (R_1^5 - R_2^5) + \frac{b_{\varphi}}{4} (R_1^4 - R_2^4) + \frac{c_{\varphi}}{3} (R_1^3 - R_2^3) = 0.$$

Первое приближение по $r_{0\varphi}$ определено выражением

$$r_{0\varphi}' = \frac{R_2 + R_1 \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^{**}}{\sigma_{\varphi\varphi}^*}}{1 + \frac{\sigma_{\varphi\varphi}^{**}}{\sigma_{\varphi\varphi}^*}}.$$

Сходимость достигнута при $r_{0\varphi} = 9,145$ мм и $\sigma_{0\varphi} = 51,8$ МПа. За исходные экспериментально полученные значения поверхностных тангенциальных напряжений приняты следующие:

$$\sigma_{\varphi\varphi}^* = \sigma_{zz}^* / \mu = 50 \text{ МПа}; \quad \sigma_{\varphi\varphi}^{**} = \sigma_{zz}^{**} / \mu = 80 \text{ МПа}.$$

Графически распределение напряжений $\sigma_{\varphi\varphi}(r)$ показано на рисунке 14.

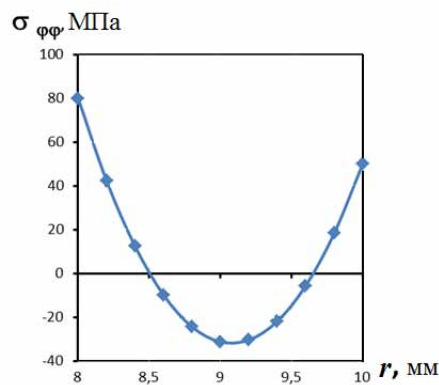


Рисунок 14 – Распределение тангенциальных остаточных напряжений

в стенке трубы при $\sigma_{zz}^* = 15$ МПа и $\sigma_{zz}^{**} = 24$ МПа

Предложенная методика позволяет простыми аппаратными средствами и несложной расчетной процедурой определять распределение остаточных напряжений в стенке трубы с точностью достаточной для технологического проектирования и для анализа существующих технологий производства, в частности, холоднодеформированных труб. Снятие достаточно тонких поверхностных слоев металла и замер приращения длины образцов не представляет больших технических трудностей, а сохранение осевой симметрии обрабатываемых образцов предотвращает дополнительные ошибки, связанные с нарушением геометрии образцов. Кроме того, предложенная методика дает возможность не ограничивать длину образцов, что избавляет от необходимости учитывать концевые эффекты искажения истинных эпюр напряжений и упрощает технику точного замера относительной продольной деформации трубы после снятия поверхностных слоев как снаружи, так и изнутри. Описанная методика показала свою эффективность при совершенствовании технологий производства теплообменных труб из коррозионностойких сталей и труб для ТВЭЛов, получаемых короткооправочным волочением, когда растягивающие остаточные напряжения чаще всего возникают на обеих поверхностях трубы.

2. Установка для определения уровня остаточных напряжений в трубах

Для экспериментальной апробации предложенной методики была сконструирована лабораторная установка для проведения экспресс-анализа остаточных напряжений в трубах. Главной особенностью установки, отличающей ее от аналогов, является возможность вращения трубы во время травления (рисунок 15).

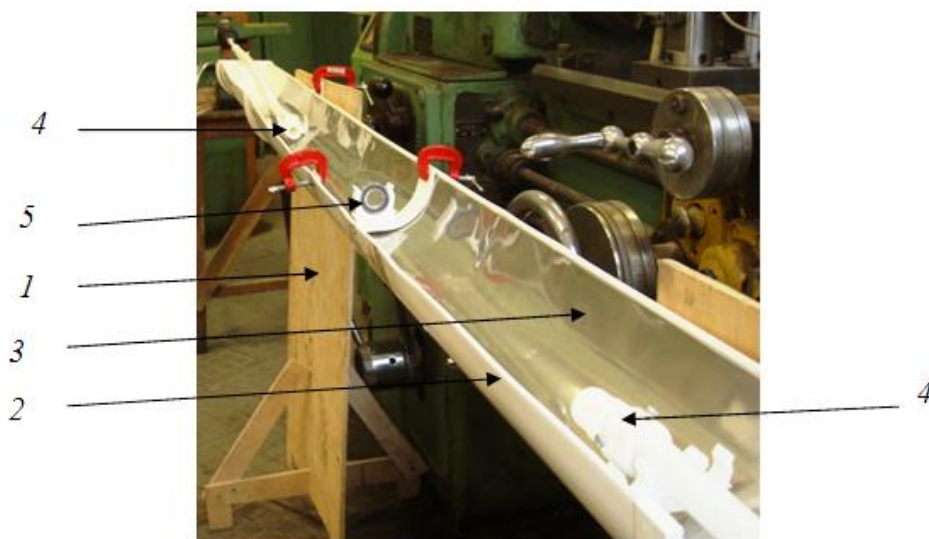


Рисунок 15 – Лабораторная установка для проведения экспресс-анализа остаточных напряжений в трубах: 1 – опоры; 2 – пластмассовая ванна; 3 – лист из стали 08X18H10T; 4 – гибкий привод вращения; 5 - подшипник

Установка состоит из ванны с электролитом, системы привода к образцу крутящего момента и электрической цепи, включающей в себя выпрямитель электрического тока.

В качестве электролита использовался раствор кислот, содержащий H_3PO_4 – 86%, Cr_2O_3 – 12% (в граммах) и H_2SO_4 – 2%. В экспериментах использовался выпрямитель электрического, позволяющий регулировать как выходной ток, так и выходное напряжение во время работы.

Для предварительного исследования кинетики травления нержавеющей сталей и в частности труб 16x1,5 из стали 08X18H10T в выбранном электролите были проведены эксперименты по травлению поверхностного слоя на образцах, вырезанных из труб в состоянии поставки. Эксперименты проводились на установке (рисунок 16), включающей в себя держатель с зажимом 1, стеклянный стакан с втулкой из нержавеющей стальной ленты 2 и выпрямитель 3.



Рисунок 16 – Установка электролитического травления и подготовленный образец: 1 – зажим; 2 – стеклянный стакан со стальной лентой; 3 – выпрямитель, 4 – подготовленный образец

Образец с предварительно заглушенными торцами закреплялся в зажиме держателя и опускался в стакан с электролитом. Образец являлся анодом, а лента в стакане – катодом. После сбора цепи подавался электрический ток и начинался процесс травления. В ходе эксперимента фиксировалось время травления, а также диаметр образца. Кроме того были проведены эксперименты с силой тока 1, 2 и 5 А. В результате проведенных исследований были получены зависимости диаметра трубы от времени травления (Рисунок 17). Опытным путем установлено, что для достижения качественной поверхности следует использовать ток не более 1 – 2 А, поскольку при большой скорости травления возможно неравномерное стравливание металла и вытравление границ зерен.

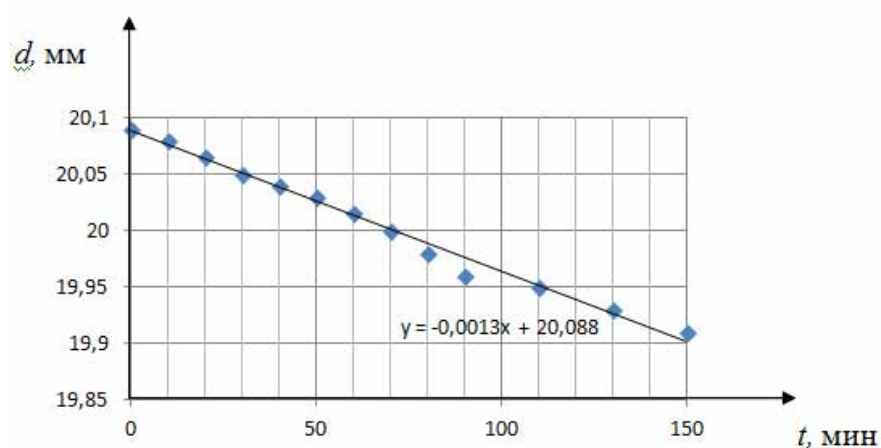


Рисунок 17 – Зависимость диаметра образца от времени травления

Таким образом, было установлено, что для проведения эксперимента на лабораторной установке, следует использовать силу тока $I = 2$ А, при этом скорость травления составляет 0,002 мм/мин.

Целью экспериментального исследования являлось получение распределения продольных остаточных напряжений в стенке труб. Согласно разработанной методике

необходимо снять слой металла с поверхности трубы и измерить, изменение ее длины. Толщина стравливаемого слоя должна быть с одной стороны не слишком большой для возможности определения остаточных напряжений в как можно более тонком поверхностном слое, с другой стороны – не слишком тонкой, для технической возможности фиксации изменения длины трубы после травления, кроме того в противном случае обеспечить гарантированную точность травления будет сложно.

Одной из трудностей реализации процесса стравливания слоя металла с труб и прутков является неравномерность травления. Дело в том, что пузырьки газа, образующиеся при травлении, а так же продукты травления, препятствуют равномерному протеканию процесса. Для достижения равномерного стравливания слоя металла в установке предусмотрено вращение образца вокруг собственной оси на всем протяжении эксперимента.

В основном эксперименте использовались трубы 16x1,5. Образцы предварительно подготавливались. Сначала труба отрезалась в размер, затем на нее одевался подшипник, после чего производилась изоляция торцов образца с использованием полипропиленовой пробки и жидкого капрона. Слой капрона хорошо изолирует поверхность образца от попадания электролита, а так же дает возможность точно установить начальную длину рабочей части образца. Все элементы привода установки, контактирующие с электролитом, выполнены из фторопласта Ф4 и полипропилена, что гарантирует стойкость механизмов в агрессивной среде, а так же обеспечивает изоляцию от электрического тока. Схема установки представлена на рисунке 18.

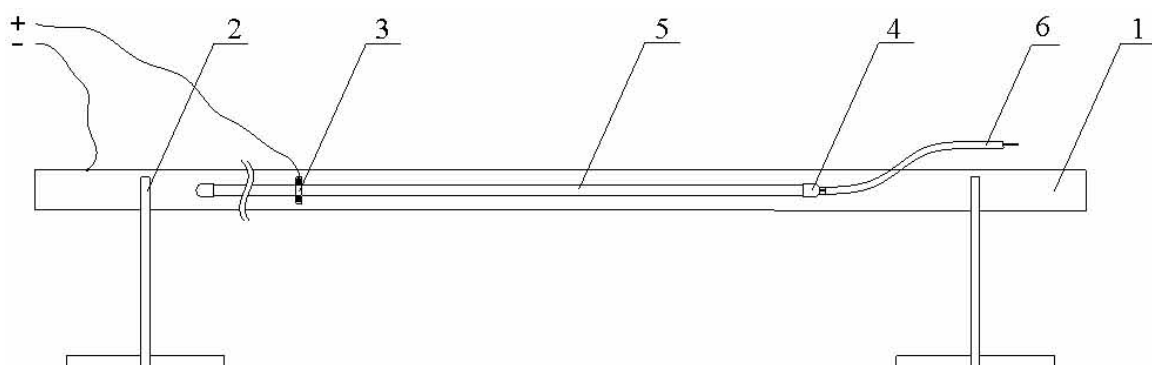


Рисунок 18 – Лабораторная установка для экспресс-анализа остаточных напряжений в трубах: 1 – ванна; 2 – опоры; 3 – подшипник; 4 – подвижные захваты; 5 – образец; 6 – гибкий привод вращения

Неподвижная часть установки состоит из ванны 1, опирающейся на опоры 2 и стальной ленты, уложенной в ванну. Момент вращения передается образцу 5, закрепленному в захватах 4 через гибкий вал 6 от двигателя. Электрический ток подается от выпрямителя через подшипник 3 на образец 5.

Ход эксперимента

Измеренный образец 5 с предварительно заглушенными торцами и одетым подшипником 3 закреплялся в захватах 4, которые установлены на гибких валах 6. После этого на подшипник и стальную ленту подключались контакты, и вся подвижная конструкция опускалась в ванну 1, заполненную электролитом. Включался привод вращения, после чего замыкалась электрическая цепь и начинается процесс травления. После снятия слоя нужной толщины измеряется диаметр образца и его длина.

В случае стравливания слоя металла с внутренней стенки трубы измеренный образец 5 предварительно обматывался изоляцией для того чтобы не травилась наружная поверхность стенки трубы. Далее на образце закреплялся подшипник 3 и изолировались торцы, после чего ход эксперимента продолжался, как и для случая травления наружной поверхности стеки трубы.

Измерение образца проводилось до и после эксперимента при помощи динамометра, закрепленного на жесткой раме (Рисунок 19). Конструкция для измерения длины образца включает в себя динамометр 1 для измерения удлинения, планку 3 и две шайбы 2 и 4. Все элементы соединены друг с другом и образуют жесткую систему. Для более точного измерения длины перед травлением на торцах образцов делались засечки, и после эксперимента образец измерялся в том же положении, что и до него.



Рисунок 19 – Иллюстрация принципа измерения длины образца до и после эксперимента:

1 – динамометр; 2 – подвижная шайба; 3 – планка;

4 – неподвижная шайба

Все эти меры позволяют говорить о том, что точность измерений в эксперименте достаточна для оценки абсолютного изменения длины образца после стравливания поверхностного слоя металла.

Эксперимент проводился на трубах 16х1,5 из стали 08Х18Н10Т производства ОАО «ПНТЗ» в состоянии поставки. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений удлинения/укорочения труб после травления

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Откуда стравливался слой	нар	нар	нар	нар	нар	нар	вн	вн	вн
Сила тока I , А	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Напряжение U , В	3	3	2	2	2	2	2	2	2
Время эксперимента, t , мин	150	150	140	130	130	130	130	130	130
Начальная длина l_0 , мм	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450	1450
Начальный диаметр d_0 , мм	16,01	16,00	16,01	16,00	16,00	16,00	16,01	16,00	16,00
Абсолютное удлинение Δl , мм	0,08	0,09	0,11	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07
Изменение диаметра, Δd , мм	0,12	0,12	0,12	0,11	0,09	0,12	0,06	0,06	0,08

Зная абсолютное удлинение (укорочение) рабочей части образца Δl после стравливания поверхностного слоя, можем рассчитать остаточные напряжения в стенке трубы. В соответствии с разработанной методикой продольные остаточные напряжения σ_{zz}^* определяются по формуле (8):

$$\sigma_{zz}^* = E \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{R_1'^2 - R_2^2}{R_1^2 - R_1'^2}$$

Для расчета распределения напряжений σ_{ii} в объеме стенки трубы, используя экспериментально найденное значение σ_{zz}^* , можно определить при $r = R_1$

$$a_0 = \frac{\sigma_{zz}^*}{\mu R_1^2 (1 - \bar{R})},$$

и подставив его в формулы (10-12), найти все компоненты тензора напряжений.

Распределения остаточных напряжений в стенке теплообменных труб 16x1,5 в состоянии поставки, определенные предлагаемым методом, приведены на рисунке 20.

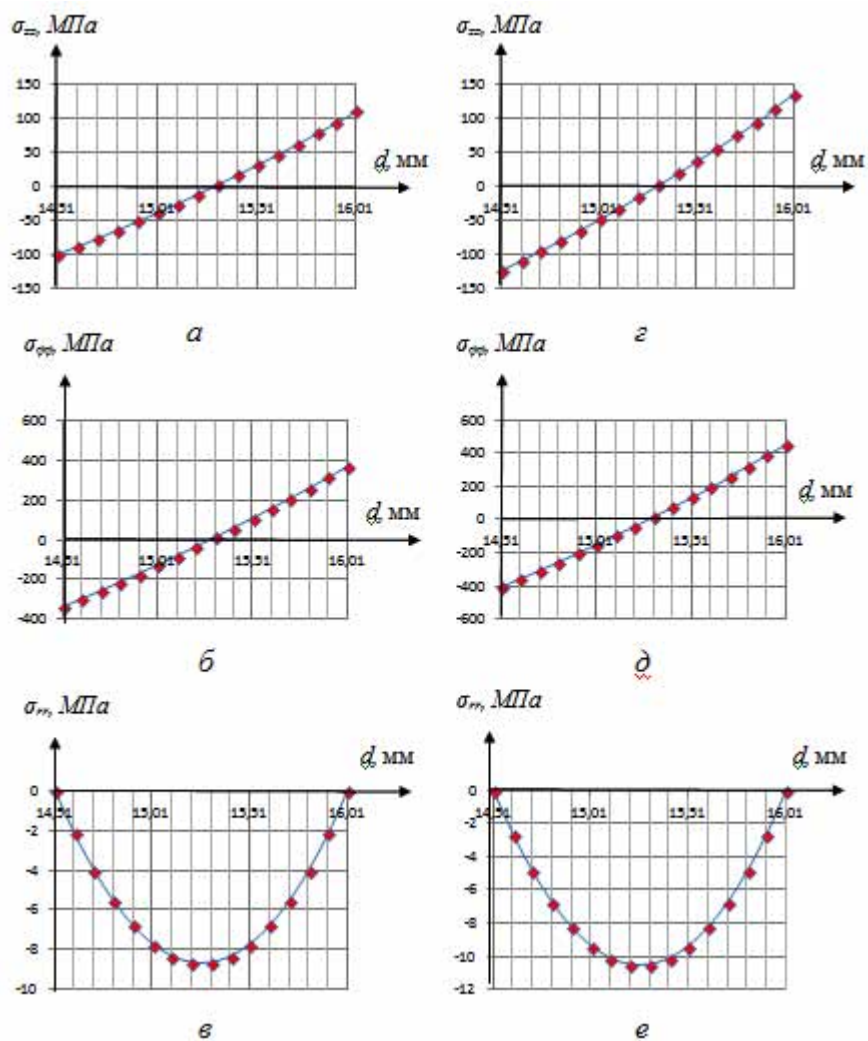


Рисунок 20 – Распределения остаточных напряжений по стенке трубы рассчитанные по предлагаемой методике: *a* – продольные (после стравливания наружного слоя), *б* – тангенциальные (после стравливания наружного слоя), *в* – радиальные (после стравливания наружного слоя), *г* – продольные (после стравливания внутреннего слоя), *д* – тангенциальные (после стравливания внутреннего слоя), *е* – радиальные (после стравливания внутреннего слоя)

Выводы

Предложенная методика позволяет простыми аппаратными средствами и несложной расчетной процедурой определять распределение остаточных напряжений в стенке трубы с точностью достаточной для технологического проектирования и для анализа существующих технологий производства, в частности, холоднодеформированных труб. Снятие достаточно тонких поверхностных слоев металла и замер приращения длины образцов не представляет больших технических трудностей, а сохранение осевой симметрии обрабатываемых образцов предотвращает дополнительные ошибки, связанные с нарушением геометрии образцов. Кроме того, предложенная методика дает возможность не ограничивать длину образцов, что избавляет от необходимости учитывать концевые эффекты искажения истинных эпюр напряжений и упрощает технику точного замера относительной продольной деформации трубы после снятия поверхностных слоев как снаружи, так и изнутри.

Рассчитанные поля остаточных напряжений хорошо соотносятся с данными, приведенными другими авторами, а так же данными завода изготовителя [16].

Установки для определения остаточных напряжений предлагаемой конструкции позволяет определять остаточные напряжения не только в трубах, но и в прутках и профилях, что значительно расширяет возможную сферу ее применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка атласа дефектов теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР. Бакиров М.Б, Клещук С.М., Чубаров С.В. и др.
2. Серебряков, Ан.В. Проблемы теплообменных труб для АЭС. Задачи и пути решения по повышению эксплуатационных свойств теплообменных труб /Ан.В. Серебряков, В.В. Мальцев, Н.М. Оборотова и др. //Труды международной НТК «Трубы-2009», Челябинск: ОАО «РосНИТИ», 2009. – С.213-220.
3. Оценка динамики зарождения и развития повреждений теплообменных труб парогенераторов типа ПГВ-1000 в рабочих режимах. Казаров Г.П., Суворов С.А., Федорова В.А. и др.
4. Адамович А.И., Свириденко И.И. Проблемы технологии вихретокового контроля при исследовании дефектных труб парогенераторов АЭС.
5. В.А. Викин, В.В. Жбанников, А.Н. Прытков, В.И. Фоменко, В.М. Бризицкий, М.Г. Щедрин, М.П. Сливкин, В.М. Илясов, В.М. Рогов, А.В. Галанин, «Целостность теплообменных труб парогенераторов Нововоронежской АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000», в сборнике «Применение материалов в проектировании, производстве и эксплуатации оборудования АЭС», Материалы 8-й международной конференции, том 2, С-Пб – Сосновый Бор, 14-17 Июня 2004г, стр. 138-163.
6. Неклюдов, И.М. Коррозионные повреждения теплообменных труб парогенераторов южно-украинской АЭС / И.М.Неклюдов, Л.С.Ожигов, А.С. Митрофанов и др.// Вопросы атомной науки и техники. - 2003ю - №6.
7. Мальцева, Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии: Учебное пособие. / Под редакцией д.т.н., проф. С.Н.Виноградова. Пенза: Изд-во Пенз. Гос.ун-та, 2000. - 211 с.
8. Серебряков А.В. Проблемы теплообменных труб для АЭС пути их решения. XVII международная научно-техническая конференция «ТРУБЫ-2009», 22-23 сентября, Челябинск.
9. Жбанников, В.В. Аварийное отключение ЗПГ-4 Нововоронежской атомной станции в связи с образованием трещины на трубке, динамика переходного процесса и способ перевода ПГ и РУ в безопасное состояние/ В.В.Жбанников, В.М.Бризицкий , К.Г.Барабаш //7-ой международный семинар по горизонтальным парогенераторам, ФГПУ ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 3-5 октября 2006.

10. Зубченко, А.С.. Коррозионное растрескивание аустенитных хромоникелевых сталей / А.С.Зубченко , Г.Ф.Банюк , И.Л.Харина // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Обеспечение безопасности АЭС». 2008. №23. с.76-84.
11. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения/Природа, 2002, №10.
12. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
13. Патент РФ №2366912. МПК G01L1/00. Способ определения остаточных напряжений/ Заяв. 24.03.2008 № 2008111436/28. Авт. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. /Патентообладатель: Пермский государственный технический университет /Опубл. 10.09.2009.
14. Буркин С.П., Картак Б.Р., Щипанив А.А. Расчет остаточных напряжений в холоднотянутой проволоке./ В сб. «Обработка металлов давлением». Свердловск: Изд. УПИ им. С.М. Кирова. 1976, № 3. С. 76-80.
15. Давиденков Н.Н. В кн. Рентгенография в применении к исследованию материалов. М.: Изд. ОНТИ, 1963. 248 с.
16. Колмогоров, Г.Л. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий: моногр. / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, В.В. Тиунов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 226 с.